



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

LanammeUCR

Laboratorio Nacional de
Materiales y Modelos Estructurales

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe: EIC-Lanamme-INF-1411-2023

Revisión bibliográfica

Uso de agregados calizos combinados con agregados silíceos y su efecto en la fricción de mezclas asfálticas en caliente



Preparado por:

**Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)**

Documento generado con base en el Artículo 6, inciso i) de la ley 8114, Capítulo 7, artículo 66 del Reglamento al Art. 6 de la precitada ley, publicado mediante decreto DE-37016-MOPT

San José, Costa Rica
noviembre de 2024



1. Informe: EIC-Lanamme-INF-1411-2023		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Uso de agregados calizos combinados y su efecto en la fricción de mezclas asfálticas en caliente		4. Fecha del Informe 11-nov.-24
5. Organización y dirección: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel: (506) 2511-2500		
6. Notas complementarias		
7. Resumen <i>En Costa Rica, existen diversas fuentes de materiales granulares, dentro de las cuales se cuenta con yacimientos de piedra caliza (ubicadas sobre todo en el norte y sur oeste del país). Estos materiales cuentan con características deseables para la formulación de mezclas asfálticas, sin embargo, poseen una alta tasa de pulimento que pueden presentar problemas de seguridad en presencia del agua debido al hidropilado, razón por la que en las especificaciones nacionales su uso para superficies de ruedo ha sido limitada. La alta correlación entre la resistencia al deslizamiento del pavimento y la tasa de choques vehiculares exige un sistema integral para predecir la resistencia al deslizamiento del pavimento asfáltico basado en las características del material y el diseño de la mezcla. Por lo tanto, esta revisión bibliográfica pretende esclarecer algunos conceptos importantes para establecer el efecto del uso de agregados calizos en capas de ruedo y su efecto en la fricción de estas.</i>		
8. Palabras clave Mezcla asfáltica, Agregados, Calizas, Pulimento, Fricción	9. Nivel de seguridad: No aplica	10. Núm. de páginas 48
11. Elaborado:		
Ing. Tania Ávila Esquivel, MSc Investigadora UIIT	Ing. Gianluca Corazzari Herrera Investigador UIIT	
12. Revisado por:		13. Revisado y aprobado por:
Ing. Fabián Elizondo Arrieta, MBA. Coordinador UIIT		Ing. Ana L. Elizondo Salas, M.Sc. Coordinadora PITRA



ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	6
2	OBJETIVOS	6
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3	JUSTIFICACIÓN	7
4	MARCO TEÓRICO	8
4.1	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	8
4.2	TEXTURA DE LA CAPA DE RUEDO	9
4.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGREGADO QUE AFECTAN LA TEXTURA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	11
4.4	INFLUENCIA DE FACTORES EXTERNOS EN LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	12
4.5	MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO Y LAS PROPIEDADES FRICCIÓNANTES DE LOS MATERIALES	14
4.6	LIMITACIONES DEL ENSAYO DE PULIMIENTO ACELERADO	21
4.7	MODELOS PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	23
4.8	ESPECIFICACIONES DE PULIMIENTO, FRICCIÓN Y DURABILIDAD	37
5	CONCLUSIONES	41
6	RECOMENDACIONES	43
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Características de textura de la superficie de rodamiento</i>	9
Figura 2 <i>Correlación entre la macrotextura, microtextura, resistencia al deslizamiento y velocidad</i>	11
Figura 3 <i>Esquema básico de los equipos de rueda oblicua y las fuerzas involucradas</i>	16
Figura 4 <i>Resumen de los equipos utilizados para medir la resistencia al deslizamiento</i> ..	21
Figura 5 <i>Categorías deficientes encontradas en el ensayo de pulimiento acelerado</i>	22
Figura 6 <i>Variación del CPA (PV) con las pasadas del péndulo, para distintos agregados</i> 23	
Figura 7 <i>Diagrama de flujo para predicción de la fricción</i>	32
Figura 8 <i>Diagrama esquemático de las investigaciones en resistencia a la fricción</i>	33
Figura 9 <i>Estándares de distancia de seguridad en tiempo real bajo tres condiciones principales de circulación experimentadas por un vehículo</i>	35
Figura 10 <i>Diseño conceptual de un sistema de alerta temprana de seguridad en tiempo real</i>	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Coefficientes de pulimiento acelerado mínimos CR-2020</i>	37
Tabla 2 <i>Coefficiente de pulimiento acelerado PG-3 España</i>	38
Tabla 3 <i>Clasificación de fricción de Louisiana</i>	39
Tabla 4 <i>Definición de las clasificaciones de fricción</i>	39
Tabla 5 <i>Especificación Francesa para la demanda de textura</i>	40



RESUMEN EJECUTIVO

En Costa Rica, existen diversas fuentes de materiales granulares, dentro de las cuales se cuenta con yacimientos de piedra caliza (ubicadas sobre todo en el norte y sur oeste del país). Estos materiales cuentan con características deseables para la formulación de mezclas asfálticas, sin embargo, poseen una alta tasa de pulimento al estar en presencia del agua, razón por la que en las especificaciones nacionales su uso para superficies de ruedo ha sido limitada. La alta correlación entre la resistencia al deslizamiento del pavimento y la tasa de choques vehiculares exige un sistema integral para predecir la resistencia al deslizamiento del pavimento asfáltico basado en las características del material y el diseño de la mezcla. Por lo tanto, esta revisión bibliográfica pretende esclarecer algunos conceptos importantes para establecer el efecto del uso de agregados calizos en capas de ruedo y su efecto en la fricción de estas.



1 INTRODUCCIÓN

Esta revisión bibliográfica pretende esclarecer algunos conceptos importantes para establecer el efecto del uso de agregados calizos en capas de ruedo y su efecto en la fricción de estas. La resistencia al deslizamiento en pavimentos asfálticos es un factor crítico que influye directamente en la seguridad y eficiencia del tráfico vehicular. Este fenómeno se refiere a la capacidad de los pavimentos para proporcionar la adherencia necesaria entre los neumáticos de los vehículos y la superficie de la carretera, lo que es fundamental para prevenir derrapes y asegurar la estabilidad durante la conducción. Uno de los elementos clave que afecta la resistencia a la fricción en pavimentos asfálticos es la presencia y la calidad de los agregados utilizados en la mezcla asfáltica, por lo tanto, la elección adecuada de estos materiales es esencial, ya que, algunos de estos son susceptibles al pulimiento acelerado.

En este contexto, es fundamental comprender cómo la forma, textura, composición mineralógica y tamaño de los agregados impactan en la capacidad del pavimento para ofrecer una fricción óptima. Una distribución adecuada de los agregados puede mejorar significativamente la adherencia entre los neumáticos y la superficie de la carretera, contribuyendo así a la seguridad vial, entre otros factores. Por otro lado, una selección inapropiada de agregados puede resultar en una reducción de la fricción, aumentando el riesgo de accidentes y afectando negativamente el desempeño general de la carretera.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Investigar mediante una revisión bibliográfica el uso de agregados calizos en combinación con otros tipos de agregados en el diseño de mezclas asfálticas en caliente, para la comprensión de su efecto en la fricción y durabilidad de la capa de ruedo.

2.2 Objetivos Específicos

1. Investigar los conceptos y las características físicas de pulimiento y durabilidad de los agregados calizos y otros tipos de agregados, así como otros factores externos,



en relación con la resistencia al deslizamiento de la superficie de rodamiento del pavimento.

2. Investigar sobre los métodos para determinar la resistencia al deslizamiento y las propiedades friccionantes de los materiales, así como la durabilidad en la mezcla asfáltica en caliente.
3. Recopilar especificaciones nacionales e internacionales de fricción y durabilidad, para el establecimiento de los criterios de diseño de mezcla asfáltica en caliente con combinación de agregados calizos.
4. Identificar la viabilidad del uso de combinación de agregados calizos con otro tipo de agregados a partir de experiencias internacionales, para su aplicación en Costa Rica.

3 JUSTIFICACIÓN

La alta correlación entre la resistencia al deslizamiento del pavimento y la tasa de choques vehiculares exige un sistema integral para predecir la resistencia al deslizamiento del pavimento asfáltico basado en las características del material y el diseño de la mezcla. La Red Vial (RV) pavimentada de Costa Rica consta de 10240 km a lo largo y ancho del país, de estos se cuenta con pocos datos (2373,6 km) de resistencia al deslizamiento (UGERVN, 2023), de los cuales el 80 % se encuentran en condición deslizante o muy deslizante.

En Costa Rica, existen diversas fuentes de materiales granulares, dentro de las cuales se cuenta con yacimientos de piedra caliza (ubicadas sobre todo en el norte y sur oeste del país). Estos materiales cuentan con características deseables para la formulación de mezclas asfálticas, tales como durabilidad (resistencia a la abrasión y el desgaste), capacidad cementante, resistencia al agrietamiento, a la deformación permanente y al daño por humedad, entre otros (Kikut *et al.*, 2020). A pesar de esas características poseen una alta tasa de pulimento al estar en presencia del agua, razón por la que en las especificaciones nacionales su uso para superficies de ruedo ha sido limitada. Sin embargo, existen proyectos recientes como Playa Paquera-Naranjo, ejecutado en el 2020 (UAT, 2021); en donde se han utilizado, debido a la escasez de fuentes cercanas con presencia de otro tipo de materiales.



Po otro lado, el acarreo de materiales para construcción de obras carreteras representa uno de los rubros de mayor costo dentro de los proyectos, razón por la cual, el aprovechamiento de las fuentes cercanas de yacimientos tiene un alto impacto en la reducción del valor de estos. Además, representa una mayor eficiencia en el uso de los recursos y una disminución en el impacto ambiental asociado.

Es por todas las razones anteriormente mencionadas, que existe un interés en estudiar el uso de agregados calizos, combinados con otros materiales, en el diseño de mezclas asfálticas utilizadas como superficie de ruedo y su efecto en la resistencia al deslizamiento; para de esta forma establecer la posible utilización de estas, y dar un mayor aprovechamiento en el uso de los recursos naturales propios de las zonas de construcción de nuevos proyectos de carretera.

4 MARCO TEÓRICO

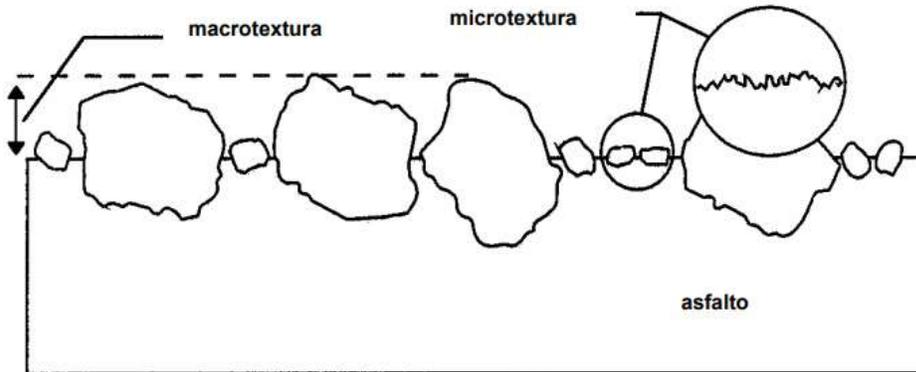
4.1 Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento es la capacidad que tiene la superficie de rodamiento del pavimento, particularmente cuando está mojado, para resistir el deslizamiento de las ruedas de los vehículos. La resistencia al deslizamiento tiene dos componentes: adherencia e histéresis. La primera resulta del corte de la unión molecular formado cuando el neumático es comprimido en el área de contacto con las partículas de la superficie del pavimento. En cuanto a la histéresis, resulta de la disipación de energía cuando el neumático se deforma al pasar a través de las asperezas de la superficie rugosa del pavimento. Ambos componentes de resistencia al deslizamiento se relacionan con las dos propiedades claves de la superficie del pavimento asfáltico, es decir, la macrotextura y la microtextura (Noyce et al., 2005) (Figura 1).



Figura 1

Características de textura de la superficie de rodamiento



Fuente. Janoo et al., 1999

El propósito principal de medir la fricción en un pavimento es para controlar su calidad durante la construcción, y como un medio para su posterior administración. Los valores de fricción son usados en la administración de pavimentos; evaluación de la restauración de la superficie de rodamiento; especificaciones para construcción, investigación de accidentes, y conservación de carreteras, entre otras. La resistencia al deslizamiento, también se emplea en aeropuertos en lo que respecta a evaluar las condiciones de la pista, y determinar las necesidades para actividades de mantenimiento y para asesorar a los pilotos durante el aterrizaje. Las mediciones de resistencia al deslizamiento también se llevan a cabo cuando un sitio manifiesta problemas potenciales de seguridad, y cuando la superficie de rodamiento ha sido tratada recientemente para corregir problemas de resistencia al deslizamiento (Noyce *et al.*, 2005)

4.2 Textura de la capa de rueda

4.2.1 Microtextura

La microtextura se refiere a las irregularidades en la superficie de las partículas de agregado (textura en escala fina) que afectan la adherencia. Estas irregularidades son las que hacen que las partículas de agregado se sientan lisas o ásperas al tacto. La magnitud de la microtextura depende de la rugosidad inicial en la superficie del agregado y de la capacidad del agregado de retener su rugosidad contra el pulimento debido a la acción del tránsito.



Por tanto, la microtextura es una propiedad del agregado que puede controlarse a través de la selección de agregados con características de resistencia al pulido adecuadas. La microtextura y la adherencia contribuyen a la resistencia al deslizamiento para todas las velocidades e influyen predominantemente en velocidades menores a 50 km/h (Noyce *et al.*, 2005), las cuales se especifican en zonas urbanas. Por otro lado, Masad *et al.* (2009) la definen como una desviación de la superficie de un pavimento a partir de una superficie plana verdadera con dimensiones características a lo largo de la superficie inferior a 0,5 mm, que proporciona una superficie rugosa tal que interrumpe la continuidad de una película de agua y produce resistencia la fricción entre el neumático y el pavimento al crear enlaces intermoleculares.

4.2.2 *Macrotextura*

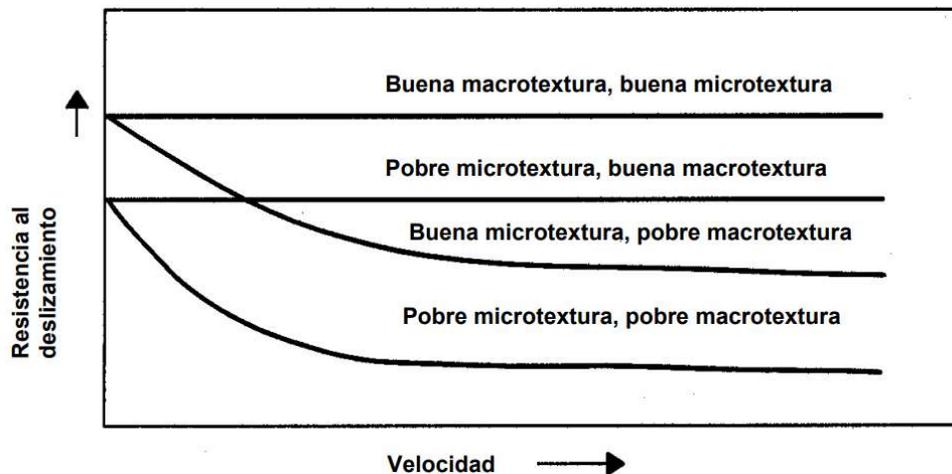
La macrotextura se refiere a irregularidades más grandes en la superficie del pavimento, que afecta la histéresis. Esta clase de irregularidades se asocian con los espacios entre las partículas de agregado. La magnitud de esta componente dependerá de varios factores. La macrotextura inicial en la superficie del pavimento será determinada por el tamaño, forma y granulometría del agregado grueso usado en la construcción del pavimento, así como también de las técnicas de construcción empleadas en la colocación de la superficie de rodamiento del pavimento. La macrotextura es también esencial para proporcionar canales de salida al agua en la interacción neumático-pavimento, para de esta manera reducir el hidropneumático. La macrotextura y la histéresis son menos importantes para velocidades bajas, pero a medida que se incrementa la velocidad se requiere una mayor macrotextura (Noyce *et al.*, 2005). Para velocidades mayores a 50 km/h, la resistencia al deslizamiento depende principalmente del espaciamiento proporcionado por el agregado, es decir, de la macrotextura (Janoo *et al.*, 1999). Por otro lado, Masad *et al.* (2009) a partir de Henry (1996) y Wambold *et al.* (1995), definen la macrotextura como una desviación de 0,5 mm - 50 mm desde una superficie plana verdadera. La Figura 2 ilustra el efecto de la macro y microtextura en la resistencia al deslizamiento como una función de la velocidad. Se puede observar que, para mantener un valor de resistencia al deslizamiento alto en varios niveles



de velocidad, la superficie de rodamiento del pavimento obliga a una buena macro y microtextura (Janoo *et al.*, 1999).

Figura 2

Correlación entre la macrotextura, microtextura, resistencia al deslizamiento y velocidad



Fuente. Janoo *et al.* (1999)

4.3 Características físicas del agregado que afectan la textura de la mezcla asfáltica

De acuerdo con Flores *et al.* (2008) las propiedades de resistencia al deslizamiento de pavimentos asfálticos dependen principalmente del agregado grueso (material retenido en la malla N°4). Los agregados de la superficie de rodamiento deben cumplir tres funciones principales:

- Mantenerse en su lugar, o sea, tener una buena adhesividad con el ligante asfáltico.
- Asegurar buenas características antiderrapantes, es decir, poseer una adecuada composición granulométrica para asegurar la macrotextura, y una buena resistencia al pulimento para brindar microtextura.
- Mantener su integridad y conservar sus propiedades el mayor tiempo posible, lo cual se relaciona con la resistencia mecánica del agregado (resistencia al desgaste y a la fragmentación).

Muchos aspectos son considerados al momento de analizar la evolución de un agregado sometido al contacto con los neumáticos:



- El desgaste reduce progresivamente la angularidad, y aumenta las superficies susceptibles de ser pulidas.
- La dureza de los minerales condiciona el tiempo que tardará el agregado en pulirse. Las calcitas se pulen más rápidamente que el feldespato y el cuarzo. El tiempo en que este pulido se alcance depende del nivel de tránsito que la solicita, fundamentalmente el número de vehículos pesados.
- La fragmentación de las partículas puede generar angularidad, los nuevos granos originados por la fragmentación poseen la angularidad de los agregados originales; restituir la microtextura (al fragmentarse una superficie ya pulida deja expuesta una nueva superficie con microtextura adecuada); y generar problemas de seguridad por la presencia de agregados sueltos en la superficie. Por lo anterior, se deben utilizar agregados que posean las siguientes características:
 - Tener una proporción importante de cuarzo (aproximadamente el 50 %) en la matriz de agregado grueso.
 - Poseer una adecuada resistencia al desgaste.
 - Poseer una estructura fina para que el pulimento se desarrolle lo más lentamente posible (Pagola *et al.*, 2002).

Lin y Tongjing. (2018) realizaron una investigación para ver el efecto de la angularidad del agregado fino sobre la resistencia al deslizamiento del pavimento, para lo cual utilizaron el ensayo acelerado *Model Mobile Load Simulator* (MMLS3), el ensayo de péndulo británico y el ensayo de mancha de arena. Los autores concluyen que la angularidad del agregado fino tiene un impacto importante en el promedio de profundidad de textura (MTD, por sus siglas en inglés), medida con la prueba de mancha de arena (macrotextura); pero poco efecto en el valor de péndulo británico, lo que significa que el agregado fino puede no tener un aporte significativo en la resistencia al deslizamiento a nivel de microtextura.

4.4 Influencia de factores externos en la resistencia al deslizamiento

De acuerdo con Kogbara *et al.* (2016) la mayor afectación causada por el medio ambiente a la fricción es por estos tres factores: la temperatura, la lluvia y los contaminantes.



4.4.1 *Influencia de la temperatura (Kogbara et al., 2016)*

Las medidas más bajas de fricción se consiguen durante el verano (temperaturas más altas), debido a que la resiliencia del caucho de las llantas aumenta y las pérdidas por histéresis se vuelven menores a medida que aumenta la temperatura. La disminución de la fricción al aumentar la temperatura también se ha atribuido a cambios en las propiedades de rigidez del asfalto y el caucho. También se han implicado cambios en la viscosidad del agua (Khasawneh y Liang, 2012). A la luz de lo anterior, algunos estudios han desarrollado ecuaciones para las fuertes correlaciones observadas entre las temperaturas del aire y del pavimento y los valores de fricción (Oliver, 1988; Bazlamit y Reza, 2005).

4.4.2 *Influencia de la lluvia (Kogbara et al., 2016)*

Las precipitaciones también provocan una variación a corto plazo en la resistencia al deslizamiento. Las mediciones de deslizamiento realizadas poco después de la lluvia pueden mostrar valores más altos que los de los períodos secos. Esto está relacionado con el efecto de contaminantes como los detritos (p. ej. polvo) y los derrames de aceite de los vehículos. El agua aplicada en las pruebas de deslizamiento realizadas durante el período seco se mezcla con el polvo, los detritos y el aceite, reduciendo así la fricción. Este efecto se reduce para mediciones realizadas poco después de períodos de lluvia (Henry, 2000).

También se ha demostrado que el número de fricción disminuye y alcanza un valor mínimo después de 7 días sin precipitaciones. El valor más bajo se mantiene hasta la próxima lluvia importante, después de la cual aumenta (Hill y Henry, 1981). Sin embargo, existen desacuerdos sobre la variación de la resistencia al deslizamiento derivada de la contaminación de la superficie del pavimento y la lluvia. Por ejemplo, se observó que la contaminación de la superficie del pavimento podría eliminarse como causa de la variación observada en la resistencia al deslizamiento (Oliver, 1988). Por lo tanto, es lógico afirmar que los mecanismos por los cuales la lluvia causa variaciones en la resistencia al deslizamiento no se comprenden bien para permitir un modelado confiable (Wilson, 2013; Genek *et al.*, 1999). Además, tal vez no sea posible explicar adecuadamente la interrelación entre los efectos de la temperatura y las precipitaciones. Observaciones limitadas muestran



que la microtextura se ve afectada por la temperatura, mientras que la macrotextura se ve afectada por la lluvia y los ciclos de hielo y deshielo.

4.4.3 *Influencia de los contaminantes (Kogbara et al., 2016)*

Se han estudiado los efectos de los contaminantes sobre los agregados en la superficie del pavimento. La adición de contaminantes a varios agregados sometidos a pulido acelerado dio como resultado diferencias de comportamiento significativas. La adición de contaminantes duros, pero de grano fino, redujo significativamente la resistencia al deslizamiento medida, ya que ayudó a pulir la superficie del agregado. Mientras que la adición de contaminantes gruesos, pero duros, mejoró significativamente la resistencia al deslizamiento medida, ya que ayudó a rayar y desgastar la superficie (Wilson, 2013). Es necesario extender las mismas investigaciones a tipos reales de contaminantes que terminan en las superficies de los pavimentos y su influencia sobre los diferentes tipos de agregados. Se requieren estudios que cuantifiquen la tasa de cambio de la resistencia al deslizamiento con el período posterior a la última lluvia en función del tipo de agregado. Esto proporcionaría una mejor comprensión del nexo entre la contaminación producto de la lluvia y la variación de la resistencia al deslizamiento mencionado anteriormente.

4.5 **Métodos para determinar la resistencia al deslizamiento y las propiedades friccionantes de los materiales**

4.5.1 *En campo*

Estos métodos se agrupan en dos categorías principales: equipos de rueda bloqueada y equipos de rueda oblicua. Adicionalmente, se presentan dos categorías que derivan de variaciones de la primera: equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento fijo y de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable.

Equipos de rueda bloqueada

Según Henry (2000) las metodologías de rueda bloqueada producen un 100 % de derrape, lo que significa que la velocidad relativa entre la llanta del equipo y la superficie es igual a la velocidad del vehículo. Estos equipos aplican el freno al neumático y una vez que este se ha bloqueado, se monitorean los valores de fricción.



Esta familia de equipos simula escenarios de frenado de emergencia en vehículos sin sistema de frenos antibloqueo (ABS, por sus siglas en inglés).

Además, estos equipos comúnmente cuentan con dispositivos para aplicar una película de agua a la superficie de medición, con la finalidad de obtener datos de fricción en condiciones críticas. Un espesor de 0,5 mm para la película de agua es utilizado en la mayoría de los equipos.

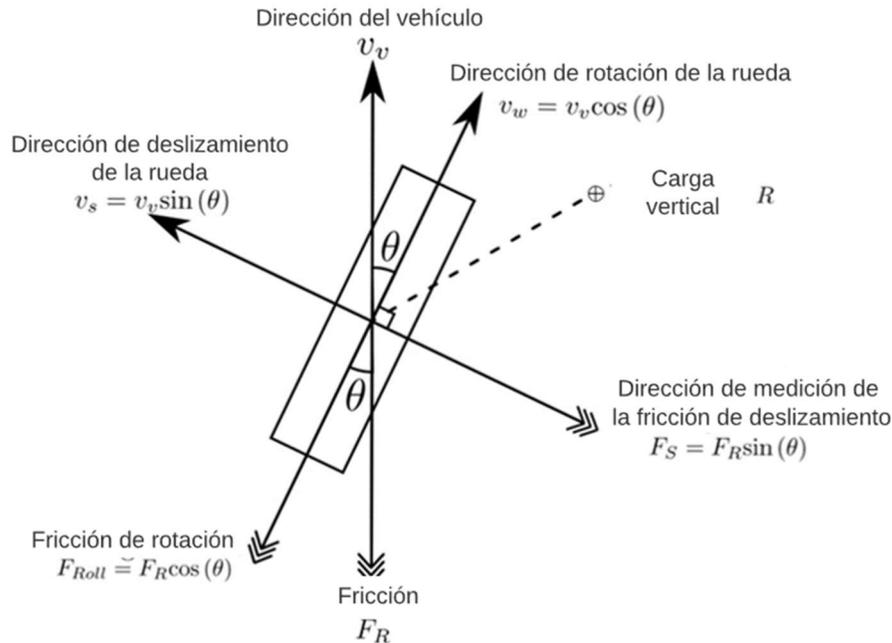
Entre los equipos de rueda bloqueada están: Tráiler ASTM E-274, Vehículo Diagonal Bloqueado (DBV, por sus siglas en inglés), Medidor de deslizamiento japonés, LCPC Adhera, Polish SRT-3, Skiddometer BV-8 y el Stuttgarter Reibungsmesser (SRM).

A partir del ASTM E-274 se obtiene el SN40 al que se hace referencia más adelante. Por ejemplo, en el Estado de Texas se utiliza como referente para generar correlaciones con el CPA y, por consiguiente, definir las especificaciones de pulimiento para el Estado. Equipos de rueda oblicua

Según Henry (2000), esta familia de equipos se caracteriza por mantener la rueda completamente libre de fuerza de frenado, pero el eje de esta se inclina de forma que el plano de la rueda quede desalineado con la dirección de movimiento, como se muestra en la siguiente figura. Esta desviación permite medir la fuerza de fricción en la dirección del eje de la rueda (perpendicular al plano de rotación de esta).

Figura 3

Esquema básico de los equipos de rueda oblicua y las fuerzas involucradas



Fuente. Sanders y Browne (2020)

A diferencia de los equipos de rueda bloqueada, la familia de los equipos de rueda oblicua busca medir la fuerza lateral que representa la capacidad de los vehículos de mantener el control en las curvas.

Dada la inclinación que se muestra en la Figura 3, la velocidad con la que la relativa entre la rueda y la superficie friccionante de la carretera está dada por la ecuación (1).

$$v_s = v_v \sin \theta \quad (1)$$

Donde,

v_s : velocidad de deslizamiento

v_v : velocidad del vehículo

θ : ángulo de convergencia

Este ángulo de convergencia hace que las mediciones de deslizamiento correspondan a una velocidad considerablemente menor a la que viaja el vehículo que remolca el equipo. Por esta razón, estos sistemas oblicuos son sensibles principalmente a la microtextura, y



es común que se encuentren acompañados de otros dispositivos para evaluación de la macrotextura.

Dentro de los equipos más comunes en esta categoría están: MuMeter, Odoliograph, SCRIM y el Stradograph.

Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento fijo

Estos equipos funcionan con un grado de deslizamiento constante de entre un 10 y 20 por ciento. Es decir, la rueda del equipo gira entre un 10 y 20 % menos rápido que la del vehículo que remolca. Eso se logra incorporando una caja reductora conectada al árbol de transmisión del vehículo. Actualmente, no existe un estándar ASTM para esta clase de dispositivos (Henry, 2000).

Al igual que los equipos de rueda oblicua con grado de deslizamiento fijo permiten realizar mediciones continuas de fricción sin que la rueda de estos experimente desgastes acelerados.

Algunos ejemplos de equipos de grado de deslizamiento fijos son: Tráiler DWW, Griptester, Runway Friction Tester, Saab Friction Tester (SFT), Skiddometer BV-11 y el Stuttgarter Reibungsmesser (SRM).

Equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable

Estos dispositivos realizan barridos de grado de deslizamiento previamente programados, utilizando motores hidráulicos para esta finalidad. Para estos dispositivos se desarrolló el estándar *ASTM E1859 Mediciones de coeficiente de fricción entre rueda y pavimento utilizando la técnica de grado de deslizamiento variable*.

También algunos de estos equipos pueden programarse de acuerdo con el estándar *ASTM E1337 Determinación del coeficiente longitudinal de frenado (PBC en inglés) de superficies pavimentadas utilizando una llanta estándar de prueba*.

Algunos ejemplos de equipos de rueda parcialmente bloqueada con grado de deslizamiento variable son: Norsemeter Oscar, Norsemeter ROAR, Norsemeter SALTAR.



4.5.2 *En laboratorio y en campo*

AASHTO T278 Propiedades friccionantes de superficie utilizando el Péndulo Británico

La prueba del Péndulo Británico (PBT, por sus siglas en inglés) es una prueba de péndulo dinámico de impacto utilizada para medir la pérdida de energía que ocurre cuando una cuña de hule es lanzada sobre una superficie de prueba.

Esta prueba puede utilizarse en pruebas de campo sobre superficies planas, para obtener valores de pulido en especímenes curvos de agregado grueso o para evaluar la microtextura de superficies.

En resumen, para determinar las propiedades friccionantes con este método, se debe limpiar adecuadamente la superficie a evaluar. Posteriormente, se debe humedecer completamente la superficie. El péndulo se posiciona sobre la superficie a medir y se sube hasta la posición bloqueada. Luego se desbloquea y se deja que el péndulo caiga hacia la superficie. Un puntero indica el número de péndulo británico (BPN, por sus siglas en inglés). Un BPN alto indica que existe mayor fricción entre la superficie de interés y la cuña de hule (AASHTO, 2021).

ASTM E1911 Medición de propiedades friccionantes de una superficie utilizando el Medidor Dinámico de Fricción (DF Tester)

El DF Tester es un instrumento portátil que permite medir las características friccionantes de superficies pavimentadas, tanto en laboratorio como en campo. Consiste en un disco horizontal giratorio con piezas de hule que entran en contacto con la superficie de interés y hacen que la velocidad rotacional del disco disminuya. También cuenta con boquillas de agua para humedecer la superficie. El torque que generan las piezas de hule se utiliza para calcular la fricción como una función de la velocidad (ASTM, 2019).



4.5.3 *En laboratorio*

AASHTO T279 Pulimento acelerado de agregados utilizando la Rueda Británica

El ensayo de pulimiento acelerado fue desarrollado en el Reino Unido y busca simular el pulimiento en el agregado grueso causado por la acción del tránsito en una superficie de rodamiento.

Los especímenes de prueba se elaboran utilizando agregado que pasa la malla de 3/8" y es retenido en la malla de 1/4". Estos especímenes se montan en la rueda metálica de la máquina de pulimiento acelerado, y se someten a pulido durante un tiempo determinado. Posteriormente los especímenes de ensayo antes y después de ser sometidos al pulimento se valoran mediante el equipo de péndulo inglés para valorar la caída en fricción y si estos alcanzan valores aceptables en función del uso posterior y características del pavimento en el que serán utilizados.

ASTM D3042 Residuo insoluble en ácido

Este método de ensayo determina el porcentaje de residuo insoluble en agregados con carbonatos, utilizando una solución de ácido clorhídrico para reaccionar con dichos carbonatos. De acuerdo con Flores, Pérez y Garnica (2008) los resultados de este ensayo pueden dar información sobre características de desgaste-pulido de algunos agregados. La presencia de material soluble en ácido puede representar rangos de resistencia al deslizamiento bajos o altos, dependiendo de la composición mineralógica y la textura del agregado en cuestión.

En resumen, este ensayo consiste en colocar una muestra de agregado lavado y secado, con masa conocida, en un recipiente. Se le adiciona ácido clorhídrico y se espera que la reacción culmine. Luego se agrega una cantidad adicional de ácido para asegurarse de que todos los carbonatos solubles han reaccionado. Finalmente, se lava y seca la muestra, para luego obtener la masa de esta. El residuo insoluble se expresa como la masa del residuo de agregado entre la masa inicial (Flores, Pérez y Garnica, 2008).



Máquina Wehner Schulze

Este dispositivo consiste en dos cabezas rotatorias: una para pulir los especímenes y otra para medir la fricción en estos. Para esta máquina se utilizan especímenes cilíndricos de 225 mm de diámetro, que pueden ser elaborados con mezcla asfáltica o únicamente contener agregado, como los del ensayo de pulimiento acelerado.

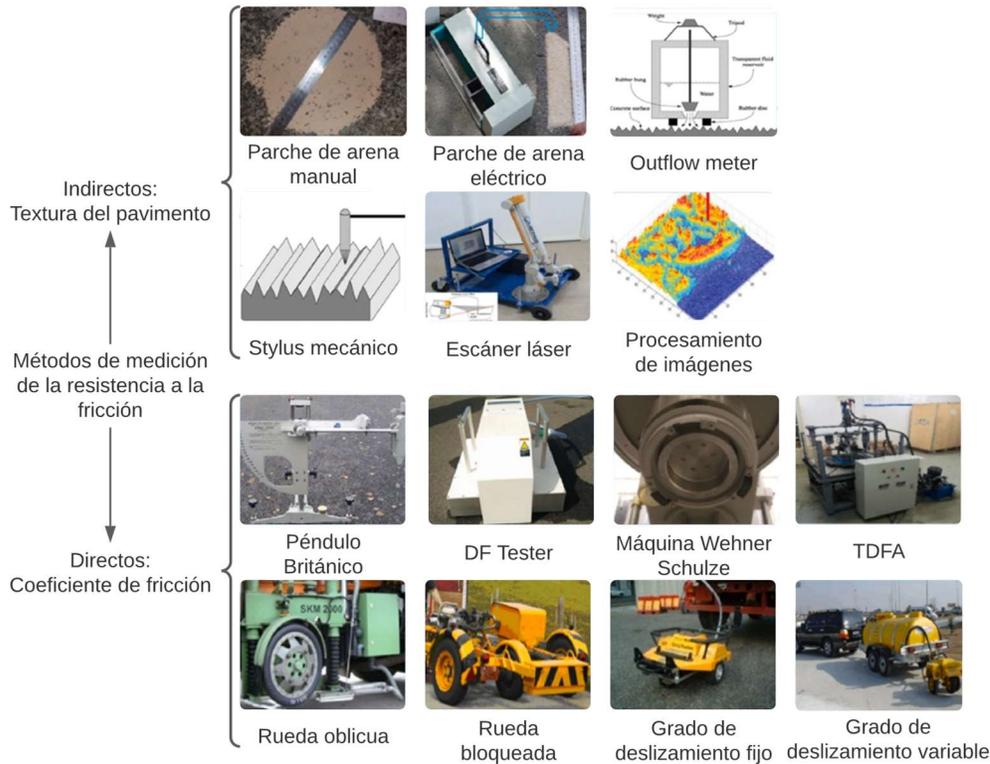
El pulimiento se logra mediante rodillos cónicos que rotan a una velocidad linear de 17 km/h y con un grado de deslizamiento de entre 0,5 % y 1,0 %. Adicionalmente, durante la prueba se aplica una mezcla de agua y abrasivo para acelerar el pulimiento.

De manera similar, la medición de fricción se realiza con una cabeza rotatoria que contiene 3 deslizadores de hule. La cabeza rotatoria se acelera, se proyecta agua sobre el espécimen y se deja caer la cabeza acelerada sobre la superficie de interés.

Finalmente, en la Figura 4 se muestra un resumen de los equipos más utilizados para medir la capacidad friccionante de la mezcla asfáltica y sus materiales (AASHTO, 2022).

Figura 4

Resumen de los equipos utilizados para medir la resistencia al deslizamiento



Fuente. Traducido de Guo *et al.* (2021)

4.6 Limitaciones del ensayo de pulimiento acelerado

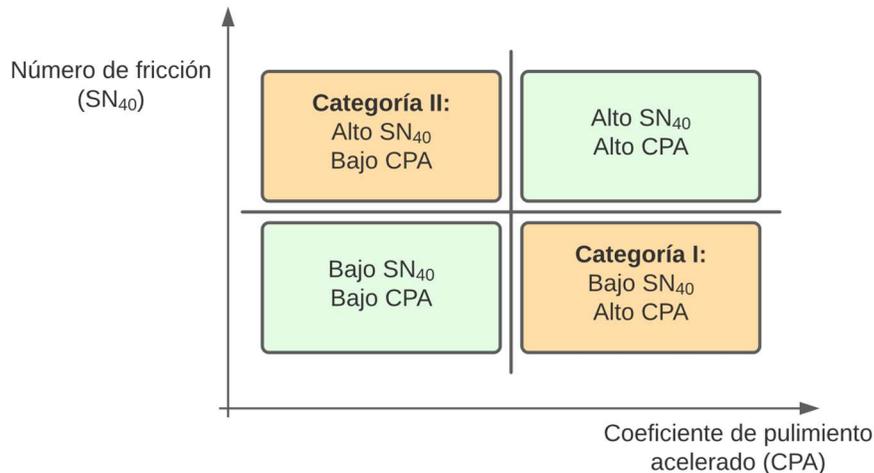
En 1998 el Departamento de Transporte de Texas (Chien y Hua, 1998) generó un informe que muestra algunas limitaciones que posee el método de ensayo de pulimiento acelerado de los agregados gruesos para correlacionarse con los resultados de número de fricción a 40 millas/hora (SN₄₀ por sus siglas en inglés).

El informe determinó que el método de prueba TxDOT (Departamento de transporte de Texas) *Tex-438-a Ensayo de pulimiento acelerado de agregado grueso*, no identifica adecuadamente los agregados que se ubican en dos de las categorías que se muestran en la Figura 5 en naranja: agregados con un coeficiente de pulimiento acelerado alto pero con baja resistencia al deslizamiento (categoría I) y agregados con un coeficiente de pulimiento acelerado bajo pero con buena resistencia al deslizamiento (categoría II).



Figura 5

Categorías deficientes encontradas en el ensayo de pulimiento acelerado



Fuente: Modificado de Chien y Hua (1998)

Las dificultades para identificar ambas categorías generan problemas de distinta naturaleza:

- Categoría I: agregados con bajo SN₄₀ y alto CPA: las fuentes de agregado que caen en esta categoría representan problemáticas económicas para la agencia estatal debido a los costos mayores asociados a un agregado con alto CPA y la necesidad de intervenir prematura e inesperadamente al encontrarse con una capa de rodamiento que pierde rápidamente su resistencia al deslizamiento. También representa riesgos de seguridad durante la operación, debidos a esta pérdida acelerada de resistencia al deslizamiento.
- Categoría II: agregados con alto SN₄₀ y bajo CPA: estos representan un desincentivo económico tanto para el estado como para las empresas productoras de agregados, debido a que se subutilizan las fuentes de agregado que tienen una buena resistencia a la fricción pero que son rechazadas debido a tener un bajo coeficiente de pulimiento acelerado.

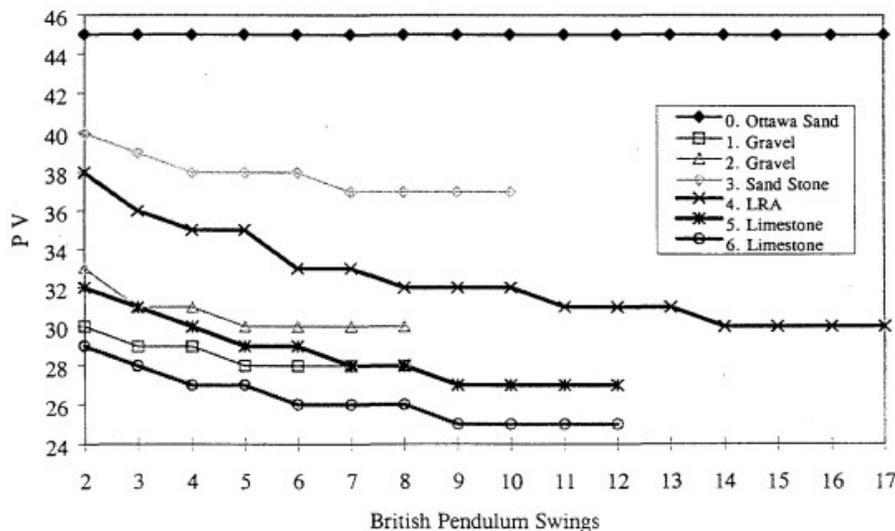
Otra limitación está relacionada con la obtención del CPA a través del promedio de lecturas del Péndulo Británico, tal y como se muestra en el estándar *AASHTO T 278 Medición de*



las Propiedades Friccionantes de una Superficie utilizando el Péndulo Británico. Chien y Hua encontraron que el CPA medido con el Péndulo Británico disminuye con cada pasada del péndulo, indicando que el hule de este continúa puliendo la superficie en cada caída. Esta variación del CPA se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Variación del CPA (PV) con las pasadas del péndulo, para distintos agregados



Fuente. Chien y Hua (1998)

Las problemáticas de categoría I y II se pueden explicar parcialmente por las diferencias en la tasa de decrecimiento del PV y el número de caídas del péndulo requeridas para alcanzar una condición residual de PV. Los investigadores han determinado que utilizar un valor residual de PV correspondiente al primer valor constante de PV que se obtenga durante 4 caídas consecutivas.

4.7 Modelos para estimar la resistencia al deslizamiento

Diversos investigadores han propuesto modelos matemáticos que permiten obtener la capacidad de resistencia a la fricción calculando el número de resistencia al deslizamiento (SN), o el número de fricción (FN) con base en algunas características de los materiales. A continuación, se resumen algunos de los estudios hallados.



Masad et al. (2009), realizan un estudio para medir y analizar distintas propiedades de los agregados utilizados para diseño de mezcla asfáltica en Texas, Estados Unidos. Las propiedades estudiadas fueron: forma del agregado usando el Aggregate Imaging System (AIMS, por sus siglas en inglés), valor del péndulo británico, insolubilidad ácida de agregados gruesos, pérdida de peso en la máquina de Los Ángeles, pérdida de peso Micro-Deval y pérdida de peso con sulfato de magnesio. Además, este proyecto desarrolló un método para predecir el número de resistencia al deslizamiento en función del tráfico y las características del agregado y el diseño de la mezcla. El método contempla los siguientes pasos:

1. Medir la textura del agregado usando AIMS antes de aplicar el Micro-Deval
2. Medir la textura del agregado usando AIMS después de aplicar el Micro-Deval
3. Calcular la textura inicial del agregado ($a_{agg}+b_{agg}$) con Ecuación (2).

$$a_{agg} + b_{agg} = 0,9848 BMD + 3,1735 \quad (2)$$

Donde:

BMD: Textura del agregado antes del Micro-Deval

4. Calcular el índice de rugosidad del agregado (ARI, por sus siglas en inglés) con Ecuación (3).

$$ARI = \frac{\left(\frac{AMD}{BMD}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{AMD}{BMD}\right)^2\right)} \quad (3)$$

Donde:

AMD: Textura del agregado después del Micro-Deval

BMD: Textura del agregado antes del Micro-Deval

5. Calcular la pérdida de textura (TL, por sus siglas en inglés) con Ecuación (4).



$$TL = \left(\frac{BMD - AMD}{BMD} \right) \quad (4)$$

6. Calcular la tasa de cambio de la textura del agregado (c_{agg}) con Ecuación (5).

$$c_{agg} = 0,0217(ARI)^{\frac{-0,131}{TL}} \quad (5)$$

7. Determinar los parámetros granulométricos de escala y forma (λ y κ , respectivamente) ajustando el modelo acumulativo Weibull (Ecuación (6)) a la curva granulométrica.

$$f(x; \kappa, \lambda) = 1 - \exp [(-x/\lambda)^\kappa] \quad (6)$$

Donde:

f : variable dependiente (porcentaje pasando acumulado)
 x : tamaño del agregado en milímetros
 λ : parámetro granulométrico de escala
 κ : parámetro granulométrico de forma

8. Calcular el valor del índice de fricción internacional (IFI) final para la mezcla (a_{mix}) con Ecuación (7).

$$a_{mix} = \frac{18,422 + \lambda}{118,936 - 0,0013x(AMD)^2} \quad (7)$$

9. Calcular el valor IFI inicial para la mezcla ($a_{mix} + b_{mix}$) con Ecuación (8).

$$a_{mix} + b_{mix} = 0,4984 \ln(5,656x10^{-4}(a_{agg} + b_{agg}) + 5,846x10^{-2}\lambda - 4,985x10^{-2}\kappa) + 0,8619 \quad (8)$$

10. Calcular la tasa de cambio del IFI para la mezcla (c_{mix}) con Ecuación (9).



$$c_{mix} = 0,765e^{\left(\frac{-7,297x10^{-2}}{c_{agg}}\right)} \quad (9)$$

11. Calcular la profundidad media del perfil (MPD, por sus siglas en inglés) del medidor de textura circular (CTMeter, por sus siglas en inglés) con Ecuación (10).

$$MPD = 1,8 - \frac{3,041}{\lambda} - \frac{0,382}{\kappa^2} \quad (10)$$

12. Calcular el valor de la constante de velocidad (S_p) con Ecuación (11).

$$S_p = 14,2 - 89,7 MPD \quad (11)$$

13. Calcular Índice de Fricción Internacional (IFI) como función de N con Ecuación (12).

$$IFI(N) = a_{mix} + b_{mix} * \exp(-c_{mix}N) \quad (12)$$

Donde:

N : número de ciclos de carga

14. Calcular el factor multiplicativo del tráfico (TMF) en términos de N con Ecuación (13).

$$TMF = \frac{A}{1 + Be^{-CN}} \quad (13)$$

Donde:

A , B y C : coeficientes de la regresión con los valores 35600, 15,96 y $4,78x10^{-2}$, respectivamente.

N : número de ciclos de pulimiento

15. Calcular el número de resistencia al deslizamiento (SN) con Ecuación (14).

$$SN(50) = 5,135 + 128,486 (IFI - 0,045)e^{\frac{-20}{S_p}} \quad (14)$$



Finalmente, Masad *et al.* (2009) concluyen que existe una alta interacción entre el desempeño del agregado, el tipo de mezcla en la que se encuentra el agregado y el nivel de tráfico. En general, es difícil clasificar los agregados sin especificar el tipo de mezcla y los niveles de tráfico al que será sometido; ya que, algunos agregados tuvieron un mal desempeño en ciertos tipos de mezcla, mientras que su desempeño fue aceptable en otros.

Rezaei *et al.* (2011) junto con Rezaei y Masad (2013), proponen un método similar al presentado por Masad *et al.* (2009), utilizando las Ecuaciones (15) y (18).

$$SN(50) = 1,41 + 143,19(IFI - 0,045)e^{(-20/S_p)} \quad (15)$$

$$S_p = 14,2 + 12,468\lambda + 7,714\kappa - \frac{3,678}{\kappa^4} \quad (16)$$

$$IFI(TMF) = a_{mix} + b_{mix} * \exp(-c_{mix} * TMF * 10^{(1/(-0,452 - 0,95c_{mix} + \frac{5,834}{c_{mix}})^{-6}))}) \quad (17)$$

$$TMF = \frac{AADT(\text{para el carril externo}) * \text{años en servicio} * 365}{1000} \quad (18)$$

Donde:

AADT: Tráfico promedio diario anual

Los otros parámetros fueron definidos anteriormente

El modelo propuesto no consideró el efecto de las estaciones climáticas en la resistencia al deslizamiento. Los resultados del estudio de investigación demostraron que la resistencia al deslizamiento es dependiente principalmente de la textura y granulometría del agregado, además, que es posible obtener una alta resistencia al deslizamiento utilizando una combinación de agregados con varios niveles de textura (Rezaei y Masad, 2013). Además, Rezaei *et al.* (2011) concluyen que el número de resistencia al deslizamiento se ve afectado por la macrotextura en mezclas densas, mientras que la microtextura gobierna el desempeño a la fricción de las mezclas porosas.



Por otro lado, Kassem et al. (2013) crearon un modelo que permite obtener la pérdida de fricción en pavimentos asfálticos, incorporando parámetros que describen la forma, resistencia a la abrasión y al pulido, y la granulometría de los agregados, además de los ciclos de pulido. El modelo obtenido se muestra en las Ecuaciones (19) a la (24).

$$IFI(N) = a_{mix} + b_{mix} * e^{(-c_{mix}*N)} \quad (19)$$

$$a_{mix} = \frac{47,493 + \lambda}{307,071 - 0,003(AMD)^2} \quad (20)$$

$$a_{mix} + b_{mix} = 0,308$$

$$* \ln \left(\frac{1,438 * (a_{TX} + b_{TX}) + 46,893 * \lambda + 333,491 * \kappa}{2,420 * (a_{GA} + b_{GA})} \right) \quad (21)$$

$$+ 1,008$$

$$c_{mix} = 0,052 + 2,284 * 10^{-14} * e^{\left(\frac{0,523}{c_{TX}}\right)} + 2,008 * 10^{-47} * e^{\left(\frac{1,708}{c_{GA}}\right)} \quad (22)$$

$$TX(t) = a_{TX} + b_{TX} * e^{(-c_{TX}*t)} \quad (23)$$

$$GA(t) = a_{GA} + b_{GA} * e^{(-c_{GA}*t)} \quad (24)$$

Donde:

N: Número de ciclos de pulido (en miles), usado el pulidor

AMD: textura del agregado después de 105 minutos en el micro-Deval medida usando el AIMS

a_{TX}, *b_{TX}* y *c_{TX}*: contantes de la regresión de pérdida de fricción de los agregados (TX(t)), calculada del ensayo de AIMS para los tiempos 0, 105 y 180 min en el ensayo de micro-Deval

a_{GA}, *b_{GA}* y *c_{GA}*: contantes de la regresión de pérdida de angularidad de los agregados (GA(t)), calculada del ensayo de AIMS para los tiempos 0, 105 y 180 min en el ensayo de micro-Deval

Los otros parámetros fueron descritos anteriormente.

Los resultados muestran que las características de los agregados y la granulometría tienen un efecto significativo sobre la pérdida de fricción. El modelo se puede utilizar para



seleccionar el tipo de agregado y la granulometría necesaria para proporcionarle al pavimento una adecuada resistencia al deslizamiento (Kassem *et al.*, 2013)

Wu *et al.* (2012) proponen una serie de pasos similares a Masad *et al.* (2009), con el fin de obtener un diseño de mezcla en laboratorio resistente a la fricción. Para esto, se cuantificó el Índice Internacional de Fricción F60, calculado a partir de números de fricción medidos con el ensayo de fricción dinámica a 20 km/h y los valores medios de profundidad del perfil obtenido. A continuación, se muestra el procedimiento establecido.

- Utilice el valor de la demanda de fricción del pavimento al final de la vida útil de diseño de la mezcla, para seleccionar un número de deslizamiento derivado de la prueba de rueda bloqueada ASTM E274 (LWST, por sus siglas en inglés) de diseño, definir el TMF de diseño.
- Utilice la Ecuación (25) para determinar el $F60^r$ requerido según la resistencia al deslizamiento (SN, por sus siglas en inglés) de diseño.

$$F60 = 0,649 SN_{50R} + 0,0572 \quad (25)$$

Donde:

SN_{50R} : El valor LWST para una rueda acanalada a 50 mph.

- Seleccione un tipo de mezcla (es decir, Superpave de 19 o 12,5 mm, SMA, OGFC).
- Calcule el valor de resistencia al deslizamiento derivado de la prueba de Péndulo Británico (CPA) requerido para las Ecuaciones (26) a la (29) según el tipo de mezcla y el $F60^T$, donde $F60^T$ es el F60 requerido por el diseño.

$$\text{Para Superpave 19mm: } F60^T = 0,067(CPA)^2 - 3,84CPA + 74,46 \quad (26)$$

$$\text{Para Superpave 12,5mm: } F60^T = 0,106(CPA)^2 - 6,19CPA + 108,75 \quad (27)$$

$$\text{Para SMA: } F60^T = -0,121(CPA)^2 + 9,417CPA - 153,52 \quad (28)$$

$$\text{Para OGFC: } F60^T = -0,066(CPA)^2 + 5,99CPA - 101,65 \quad (29)$$



- Elija una mezcla de agregados basada en el CPA requerido.
- Realizar el diseño de la mezcla y preparar al menos dos especímenes de prueba (50 × 50 cm).
- Realizar los ensayos de Fricción dinámica (DFT, por sus siglas en inglés) y Medidor de textura circular (CTMeter, por sus siglas en inglés) a los especímenes (sin pulir).
- Calcular el ciclo de pulido de laboratorio (N) con la Ecuación (30) basado en TMF.

$$TMF = \frac{35.600}{(1 + 15,96 * e^{-0,0478N})} \quad (30)$$

- Calcule F60 basándose en DFN₂₀, MPD y N con la Ecuación (31), donde F60^S es el espécimen de laboratorio F60.

$$F60 = (2,18 + 13,5MPD^i + 0,38DFN_{20}^i) * e^{(-1,73E-0,6*N)} \quad (31)$$

Donde,

DFN₂₀: Número dinámico de fricción a 20km/h, del ensayo DFT

- Si F60^S > F60^T, el diseño está completo.

Se concluye que al utilizar el número de fricción F60, fue posible diseñar una mezcla asfáltica con una resistencia al deslizamiento satisfactoria, mediante la combinación de agregados de baja y alta resistencia al deslizamiento (Wu *et al.*, 2012).

Así mismo, Wu y Abadie (2018) proponen un modelo para predecir la fricción de la mezcla durante su proceso de diseño, tomando en cuenta el CPA de los agregados, granulometría y tráfico. En los pasos siguientes y en la Figura 7 se describe el procedimiento propuesto.

- Determine la demanda de fricción para una mezcla específica y seleccione el número de resistencia al deslizamiento requerido al final de la vida útil para una velocidad de 40 mph (SN40S)
- Calcule el tráfico de diseño (T.I) usando la Ecuación (32) y el tráfico promedio diario anual (ADT, por sus siglas en inglés).



$$T.I = \frac{ADT(\text{en el carril de diseño}) * Tasa de crecimiento * 365}{10^6} \quad (32)$$

- Seleccione el tipo de mezcla de diseño (19 mm, 25 mm, Superpave, SMA, entre otras) y su granulometría y calcule los parámetros λ y κ usando el modelo acumulativo Weibull (Ecuación (6)).
- Prediga la macrotextura para la mezcla (MPD) usando la Ecuación (33).

$$MPD = 0,14\lambda + 0,09\kappa - \frac{0,041}{\kappa^4} \quad (33)$$

- Despeje el valor de fricción dinámica a 20 km/h (DFT20) requerido para el final de la vida útil (valor DFT20 mínimo requerido), usando el SN40S y el MPD (Ecuación (35)).

$$DFT20 = 0,13exp^{0,056*T.I} + 2,6PSV + 0,5exp^{PSV} \quad (34)$$

$$SN40S = 2,15 * DFT20 * exp^{-\frac{0,54}{MPD}} \quad (35)$$

- Prediga la microtextura requerida (SN40R=CPA req) usando el DFT20 calculado y el T.I, usando la Ecuación (36).

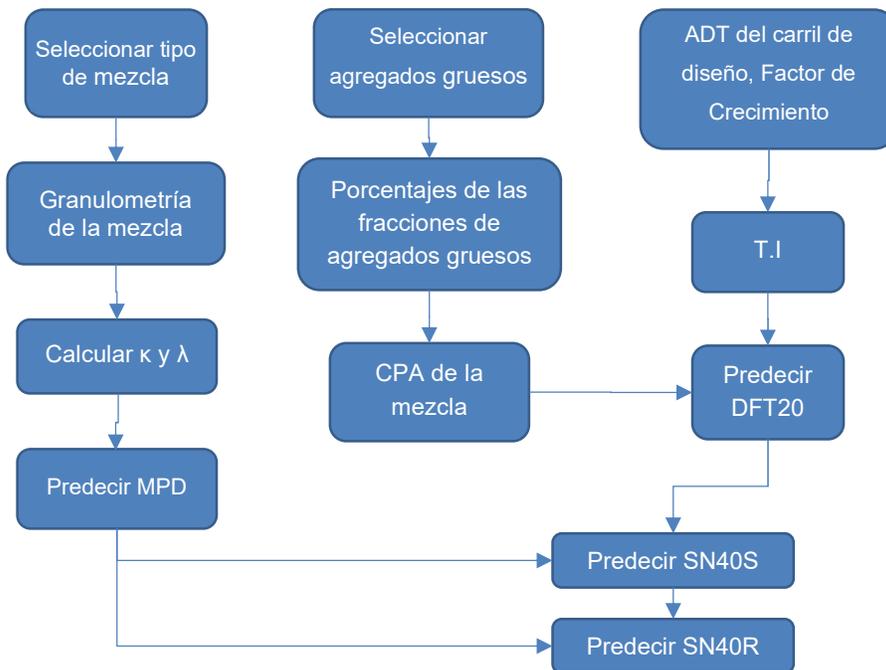
$$SN40R = 0,93SN40S - 0,16MPD + 0,26 \quad (36)$$

- Escoja una mezcla de agregados gruesos que obtenga un CPA mayor al CPA req.



Figura 7

Diagrama de flujo para predicción de la fricción



Fuente. Traducido de Wu y Abadie (2018)

Finalmente, fue posible concluir que es posible diseñar una mezcla asfáltica con una resistencia al deslizamiento adecuada utilizando una mezcla de agregados de baja y alta capacidad de pulimiento (Wu y Abadie, 2018).

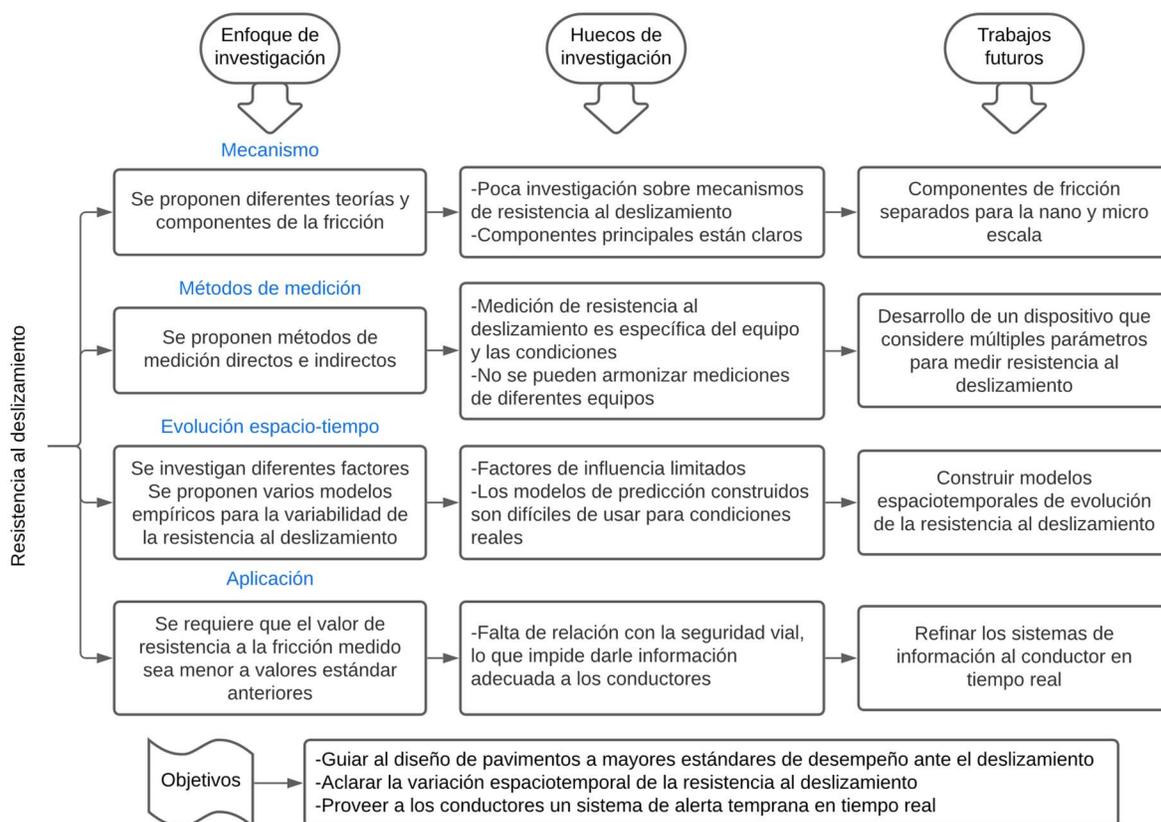
Por otro lado, Senga *et al.* (2013) proponen una ley que analiza el aporte de dos fracciones de agregados gruesos y su aporte en la textura y fricción de la mezcla, para esto utilizan el método de ensayo de Wehner y Shulze, el CPA y el Micro-Deval. Los autores concluyen que no pueden garantizar la previsibilidad de la resistencia al deslizamiento de las capas de superficie. Pero, afirman que la resistencia al deslizamiento de las mezclas bituminosas depende de la naturaleza mineralógica de los agregados que la constituyen, el diseño de la mezcla, la textura y las condiciones de servicio.

Finalmente, Guo *et al.* (2021) realizan un estudio del estado del arte sobre la resistencia al deslizamiento en donde concluyen que las investigaciones convencionales se centran en la

medición de la resistencia al deslizamiento en condiciones específicas. Lo que no permite revelar el mecanismo de resistencia al deslizamiento a partir de los genes del material y no puede caracterizar con precisión el comportamiento de la variabilidad espaciotemporal de la resistencia al deslizamiento del pavimento asfáltico bajo múltiples variables (Figura 8).

Figura 8

Diagrama esquemático de las investigaciones en resistencia a la fricción



Fuente. Traducido de Guo *et al.* (2021)

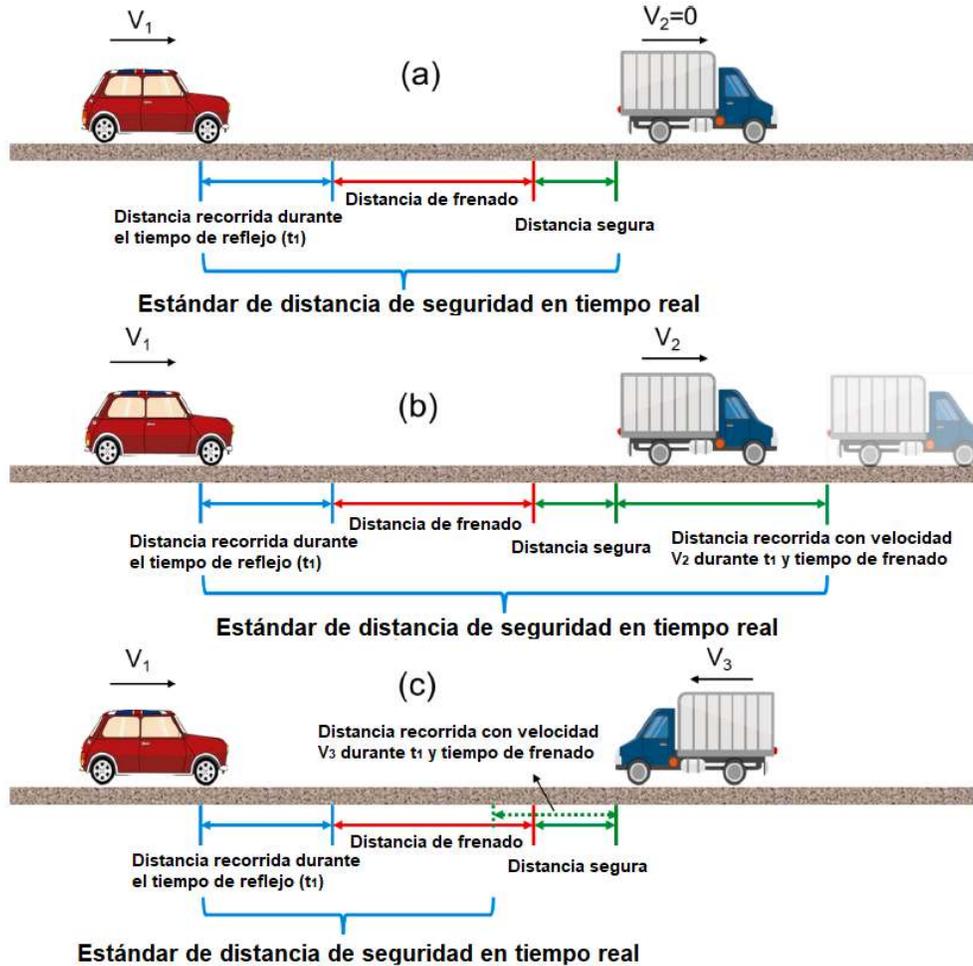
Además, la medición de valor único convencional no puede proporcionar a los conductores información de seguridad en tiempo real, durante un tiempo determinado. Por lo tanto, proponen un novedoso diseño conceptual de un sistema de alerta temprana de seguridad en tiempo real. Para esto, los autores se basan en el concepto de Tiempo hasta la colisión (TTC, por sus siglas en inglés), el cual ha demostrado ser una medida eficaz para calificar la gravedad de los conflictos de tráfico. Los investigadores propusieron varios sistemas de



prevención de colisiones (CAS, por sus siglas en inglés) para crear estrategias de advertencia basadas en un criterio TTC (Horst y Hogema, 1994). Similar a la resistencia al deslizamiento, el TTC es una variable que depende de varios factores: del vehículo, del pavimento y ambientales (lluvia, niebla, hielo, etc.). Sin embargo, se utilizaron muchas suposiciones y experiencias para determinar el criterio TTC, donde los factores relacionados con el pavimento a menudo se simplifican como un valor determinado (Burgett et al., 1998). Es posible que en el futuro se propongan criterios TTC más precisos para incluir factores relacionados más reales. El sistema propuesto se basa en los conceptos representados en la Figura 9, el método de diseños se resume de maneta esquemática en la Figura 10.

Figura 9

Estándares de distancia de seguridad en tiempo real bajo tres condiciones principales de circulación experimentadas por un vehículo: (a) vehículo delantero detenido; (b) vehículo delantero con una velocidad inferior V_2 ; (c) vehículo delantero en la dirección opuesta con la velocidad V_3

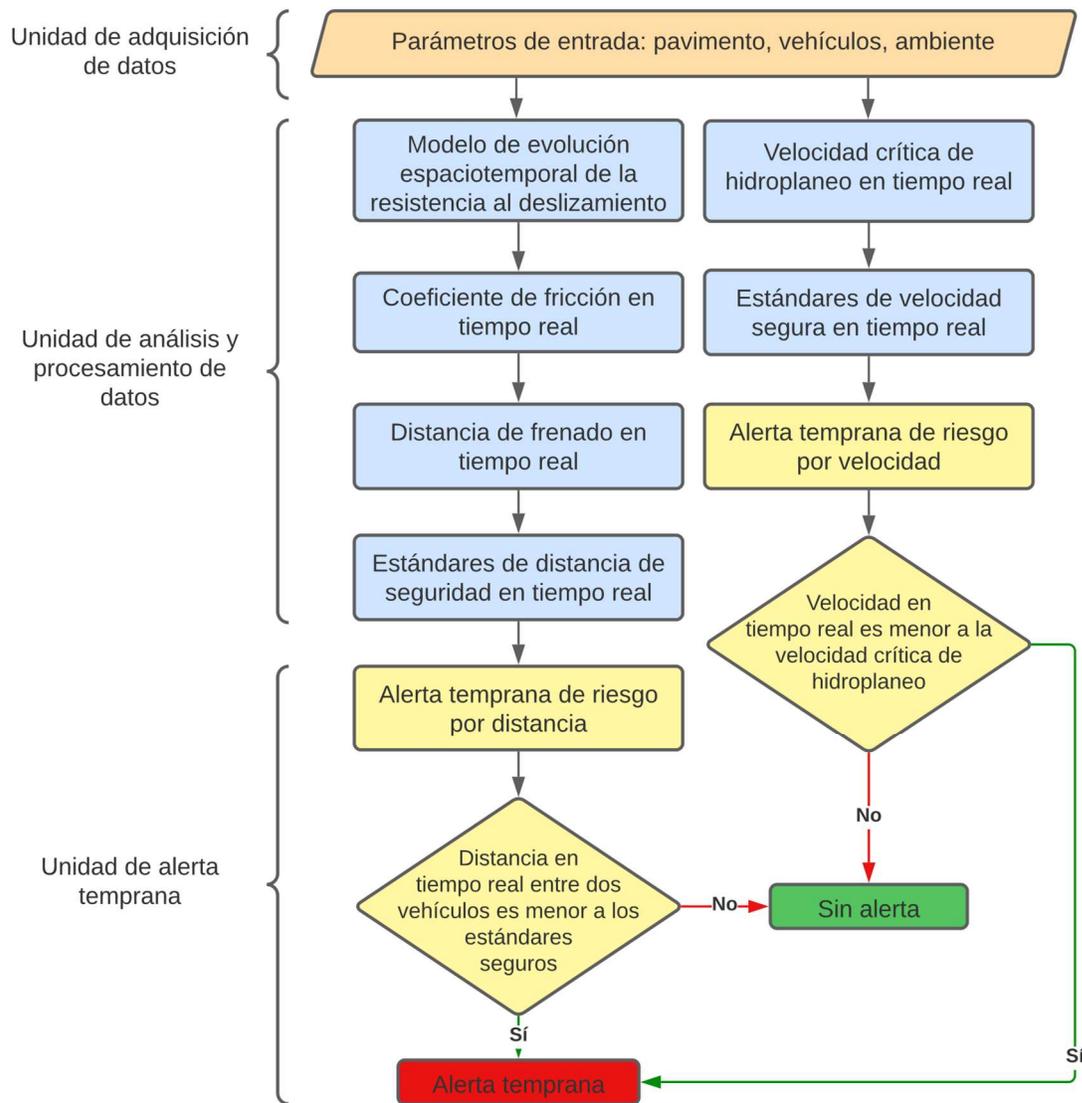


Fuente. Traducido de Guo *et al.* (2021)



Figura 10

Diseño conceptual de un sistema de alerta temprana de seguridad en tiempo real



Fuente. Traducido de Guo *et al.* (2021)

Guo *et al.* (2021) concluyen que el sistema de alerta temprana puede proporcionar información útil para que la conducción ajuste su comportamiento de maniobra a tiempo para evitar el accidente. Además de la alerta temprana, la seguridad en la conducción debería mejorarse con dispositivos de seguridad activa, medidas de seguridad avanzadas



antes de un accidente, dispositivos de seguridad pasiva (bolsas de aire) y servicios de rescate (llamada electrónica), entre otras cosas (Peussa *et al.*, 2008).

4.8 Especificaciones de pulimiento, fricción y durabilidad

En esta sección se presentan las diversas especificaciones relacionadas con fricción, pulimiento y durabilidad de la matriz de agregados, que afectan directamente a la macro y microtextura de la capa de rodamiento.

4.8.1 Especificaciones costarricenses (CR-2020)

En concordancia con la subsección 703.07 *Agregado para mezcla asfáltica*, en el apartado (e), el uso de agregados calizos está prohibido en capas de ruedo. Sin embargo, esta restricción puede levantarse si se demuestra que el material no se pule. El criterio para este levantamiento se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Coeficientes de pulimiento acelerado mínimos CR-2020

ESAL's de diseño ($\times 10^6$) (20 años, carril de diseño)	CPA Mínimo
< 0,3	44
0,3 a 30	50
> 30	56

Fuente. MOPT, 2020.

4.8.2 Especificaciones internacionales

Es importante destacar que las características mineralógicas de los agregados utilizados para definir estas especificaciones pueden distar de las de los agregados disponibles en nuestro país.

España

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España (2019), establece que el coeficiente de pulimiento acelerado para capa única o capa superior (capa de ruedo),



deberá cumplir con lo especificado en la Tabla 2, en concordancia con el indicador de nivel de tráfico pesado IMDp (intensidad media diaria de vehículos pesados).

Tabla 2
Coeficiente de pulimiento acelerado (CPA) PG-3 España

Categoría de tráfico pesado	T0	T1 a T31	T32 a T4
IMDp (vehículos pesados/día)	< 4000	< 2000 ≥ 800	< 100 ≥ 50
	≥ 2000	< 200 ≥ 100	< 50 ≥ 25
	CPA	≥ 56	≥ 50

Florida, Estados Unidos

De acuerdo con el Departamento de Transporte de Florida (2019), apartado 901-2.3 de las Especificaciones Estándar para la Construcción de Carreteras y Puentes, no se permite el uso de agregados calizos o dolomitas en capas de rodamiento, ya sean finos o gruesos. Se puede utilizar hasta un 20 % de estos agregados finos en capas que no sean de fricción, o sea, aquellas capas que no sea la capa superior de la estructura que utiliza agregados seleccionados para proveer una adecuada resistencia al deslizamiento.

Louisiana, Estados Unidos

La especificación de Luisiana está basada en grupos de agregados y su capacidad de generar fricción. En la Tabla 3 y Tabla 4 se muestra la especificación. Esta especificación está basada en CPA y microtextura.



Tabla 3
Clasificación de fricción de Louisiana

Clasificación de fricción	Uso permitido
I	Todas las mezclas
II	Todas las mezclas
III	Todas las mezclas, excepto carriles con mezcla superficial con tráfico promedio diarios mayores a 7000 ¹
IV	Todas las mezclas, excepto mezclas superficiales ²

Nota. 1. Cuando el tráfico promedio diario es mayor a 7000, mezclas con agregados tipo III y agregados tipo I y II, se podrán utilizar en mezclas superficiales en los siguientes porcentajes: al menos 30 % por peso del total de agregados deberá ser tipo I, o, al menos el 50 % por peso del total de agregados deberá ser tipo II. El total de agregado friccionante (el que se utiliza en la capa de rodamiento) no deberá tener más de 10% pasando la malla #8 (2,36 mm).

2. Cuando el tráfico promedio diario es menor a 2500, mezclas con agregados tipo IV y agregados tipo I y II, se podrán utilizar en mezclas superficiales en los siguientes porcentajes: al menos 50 % por peso del total de agregados deberá ser tipo I o II. El total de agregado friccionante no deberá tener más de 10% pasando la malla #8 (2,36 mm).

Fuente. Traducido de Wu, Z. y King B. (2012).

Tabla 4
Definición de las clasificaciones de fricción

Clasificación de fricción	Descripción
I	Agregados que tienen un CPA mayor a 37 o que poseen la habilidad de retener un número de fricción aceptable durante su vida útil
II	Agregados que tienen un CPA entre 35 y 37 o que poseen la habilidad de retener un número de fricción aceptable durante su vida útil
III	Agregados que tienen un CPA entre 30 y 34 o que poseen la habilidad de retener un número de fricción aceptable durante su vida útil
IV	Agregados que tienen un CPA entre 20 y 29

Fuente. Traducido de Wu, Z. y King B. (2012).



Francia

La especificación de Francia depende exclusivamente de la macrotextura medida a través del MTD (profundidad media de la textura superficial, por sus siglas en inglés) (Tabla 5).

Tabla 5
Especificación Francesa para la demanda de textura

Localización	Límite de velocidad (Km/h)	Tipo de pavimento	Alineación del plano	Longitud del perfil	MTD _{spe} , mm	MTD _{min} , mm
Urbana y Suburbana	$V \leq 50$	Ambos sentidos	Arteria Urbana	-	$\geq 0,40$	0,30
	$50 < V < 90$	carriles 2 x 2	Urban Express		$\geq 0,60$	0,40
	$V \geq 90$	carriles 2 x 3			$\geq 0,60$	0,40
Rural	$V=90$	Ambos sentidos	Todos los casos	Pendiente $\leq 5\%$	$\geq 0,60$	0,40
	$V=110$	carriles 2 x 2			$\geq 0,80$	0,60
		carriles 2 x 2	$\geq 0,60$	0,40		
	$V=130$	carriles 2 x 2	Radios > 600 m		$\geq 0,80$	0,60
	carriles 2 x 3 mín.	$\geq 0,60$			0,40	
					$\geq 0,70$	0,50

Fuente. Traducido de Wu, Z. y King B. (2012).



5 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de la revisión literaria realizada, se encontró lo siguiente:

1. Se identificaron los mecanismos que interactúan en la generación de la fricción entre las llantas de los vehículos y la carretera, resultando en que la resistencia al deslizamiento obedece a factores de adherencia e histéresis y que ambos se relacionan con propiedades de la mezcla asfáltica utilizada como capa de rodamiento. Que factores externos como temperatura ambiental, lluvia, y ciertos contaminante (polvo, detritos y aceites, entre otros) tienen efectos importantes en la resistencia al deslizamiento.
2. Se identificaron varios métodos para modelar matemáticamente la resistencia al deslizamiento y las propiedades friccionantes de los materiales, donde en algunos casos no se consideran las condiciones climáticas ni el pulimento de los agregados.
3. Sobre las especificaciones técnicas, la normativa nacional no permite materiales calizos en capa de ruedo excepto si se demuestra que el material no se pule. En cuanto a normas internacionales:
 - a. La norma española, sí establece un pulimiento acelerado mínimo para la capa de ruedo en función del tránsito.
 - b. La norma en Florida, USA, no permite agregados calizos y dolomitas en capas de rodamiento, ya sean finos o gruesos. Permite un 20 % de finos en capas que no sean de fricción, o sea las que no tienen una finalidad de proveer resistencia al deslizamiento.
 - c. La norma de Louisiana, USA, lo permite según el grupo de agregados y su capacidad de fricción.
 - d. La norma en Francia, lo permite según la macrotextura y según ubicación de la ruta (urbana, suburbana y rural, asociado a la velocidad de tránsito permitido, pendiente, curvaturas).

Se observa que no existe un consenso internacional en relación con el uso y los requisitos de resistencia al deslizamiento para el uso de agregados calizos en el diseño de mezclas para capa de rodamiento.



5. Sobre la viabilidad de usar una combinación de agregados calizos con otro tipo de agregados, de acuerdo con las normativas internacionales revisadas, no se hace referencia a esta posibilidad. Únicamente la norma de Florida, USA, permite un 20 % de finos en capas que nos sean de fricción.

El uso de materiales calizos se permite con restricciones y, siempre y cuando, se demuestre que no existe una reducción significativa en la fricción, cumpliendo con el estándar de seguridad propio de cada país o estado.

No se encontraron referencias internacionales que restrinjan el uso de agregados finos calizos, pues estos agregados no son evaluados específicamente en los estudios recopilados. Nuevamente, el tamaño de los agregados es tomado en cuenta únicamente mediante parámetros ajustados a la curva granulométrica de la combinación, sin diferenciar por los porcentajes de agregado calizo y silíceo.

Finalmente, se identificaron métodos de ensayo que permiten evaluar la fricción de especímenes de mezcla asfáltica, tales como, el equipo de Wehner Schulze y el Péndulo Británico; lo que permitiría estudiar la viabilidad del uso de la combinación de agregados calizos con otro tipo de agregados.



6 RECOMENDACIONES

Se plantea realizar un estudio para evaluar la fricción y accidentabilidad de rutas que se encuentren en servicio actualmente y que hayan sido construidas utilizando esta combinación de agregados.

Adicionalmente, evaluar la factibilidad de crear un equipo para pulimento acelerado de especímenes de mezcla asfáltica en caliente; puesto que, actualmente, en el LanammeUCR no se cuenta con equipos diseñados para este fin.



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). *Standard Method of Test for Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester* (AASHTO T278-90(2021)). Recuperado de [https://compass.astm.org/document/?contentCode=AASHTO%7CAASHTO%20T278-90\(2021\)%7Cen-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=AASHTO%7CAASHTO%20T278-90(2021)%7Cen-US)

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester*

Bazlamit, S.M. y Reza F. (2005). Changes in asphalt pavement friction components and adjustment of skid number for temperature. *J. Transp. Eng.* 131 (6) 470–476.

Burgett, A.L., Carter A., Miller R.J., Naim W.G. y Smith, D.L. (1998). *A collision warning algorithm for rear-end collisions*. National Highway Traffic Safety Administration. Estados Unidos.

Genek, P.D., Alabaster D.J. y Davies R. (1999). *Seasonal and Weather Normalization of Skid Resistance Measurements*. Transfund New Zealand research report 139.

Chien, F. y Chen H. (1998). *Alternate Polish Value and Soundness Specifications for Bituminous Coarse Aggregates*. Texas Department of Transportation. Estados Unidos.

Flores, M., Pérez, A. y Garnica, P. (2008). *Análisis de especificaciones de valor de pulido para agregado*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, Publicación técnica No. 315. Sanfandia, Quintana Ro, México.

Florida Department of Transportation. (2019). *Standard Specifications for Road and Bridge Construction*. Recuperado de https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/programmanagement/implemented/specbooks/january2019/files/119ebook.pdf?sfvrsn=abd5f2d5_6

Guo, F., Pei J., Zhang J., Li R., Zhou B. y Chen Z. (2021). Study on the skid resistance of asphalt pavement: A state-of-the-art review and future prospective. *Construction and Building Materials*, 303 (2021). ELSEVIER.



- Henry, J.J. (1996). Overview of the International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements: The International Friction Index. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Pavement Surface Characteristics*, Christchurch, New Zealand, September.
- Henry, J.J. (2000) Evaluation of Pavement Friction Characteristics. *NCHRP Synthesis 291*, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Washington, D.C.
- Hill, B.J. y Henry J.J. (1981). *Short-term, weather-related skid resistance variations*, Transp. Res. Rec. 836 76–81.
- Horst, R. y Hogema J. (1994). *Time-to-collision and collision avoidance systems*. TNO Institute for Human Factors. Soesterberg, Holanda.
- Janoo, V. C. y Coronen C. (1999). *Performance Testing of Hot Mix Asphalt Aggregates*. Special Report 99-20, US Army Corps of Engineers. Estados Unidos.
- Kassem, E., Awed A, Masad E. y Little D. (2013). Development of predictive model for skid loss of asphalt pavements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2372. Transportation Research Board of the National Academies. Washington D.C., Estados Unidos.
- Khasawneh, M.A. y Liang R.Y. (2012). Temperature effect on frictional properties of HMA at different polishing stages. *Jordan J. Civ. Eng.* 6 (1) 39–53.
- Kikut Cruz, K., Baldi A. y Elizondo Salas A. L. (2020). Beneficios del uso de cal hidratada en mezclas asfálticas: Revisión del estado del arte. *Revista Infraestructura Vial LanammeUCR*, Vol. 22, No. 39. San José, Costa Rica
- Kogbara, R., Masad E., Kassem E., Scarpas T. y Anupam K. (2016). A state-of-the-art review of parameters influencing measurement and modeling of skid resistance of asphalt pavements. *Construction and Building Materials* 114 (2016). ELSEVIER.
- Lin, C. y Tongjing W. (2018). Effect of fine aggregate angularity on skid-resistance of asphalt pavement using accelerated pavement testing. *Construction and Building Materials* 168 (2018) 41–46. ELSEVIER.



Masad, E., Rezaei A., Chowdhury A. y Freeman T. (2009). Field evaluation of asphalt mixture skid resistance and its relationship to aggregate characteristics. *Aggregate Resistance to Polishing and Its Relationship to Skid Resistance, Report 0-5627-2, Project 0-5627*. Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration. Estados Unidos.

Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Costa Rica (MOPT). (2020). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2020*. Ministerio de Obras Públicas y Transporte. Costa Rica.

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España. (2019). *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3)*. Recuperado de <https://www.mitma.gob.es/carreteras/normativa-tecnica/17-pliegos-de-prescripciones-tecnicas-generales>

Noyce, D. A., Bahia H. U., Yambó J. M. y Guisk K. (2005). *Incorporating Road Safety into Pavement Management: Maximizing Asphalt Pavement Surface Friction for Road Safety Improvements*. Midwest Regional University Transportation Center, Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory. Estados Unidos.

Oliver, JWH. (1988). *Seasonal Variation of Skid Resistance in Australia Special Report No. 37*, Australia Road Research Board, Victoria, Australia.

Pagola, M., Giovanon O. y Poncino H. (2002). *Relación entre el coeficiente de fricción y pulimento de agregados*. Memorias de la XXXII Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto de Argentina. Argentina.

Peussa, P., Varpula T., Koskinen S., Nord S. y Tuononen A. (2008). *On-Board Estimation of Tyre-Road Interaction*. FRICTI@N Project.

Unidad de Auditoría Técnica (UAT). (2021). *Seguimiento a la evaluación de la calidad de los materiales y de los procesos constructivos del proyecto: Mejoramiento y rehabilitación en la ruta nacional N 160, sección: Playa Naranjo-Paquera*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.



Unidad de Gestión y Evaluación de la Vial Nacional (UGERVN). (2023). *Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica*. Programa de Infraestructura del Transporte, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Rezaei, A. y Masad E. (2013). Experimental-based model for predicting the skid resistance of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 14:1, 24-35. Estados Unidos.

Rezaei, A., Masad E. y Chowdhury A. (2011). Development of a Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 12. ASCE.

Sanders, P. D. (2021). Characterizing the Measurements Made by Sideways-Force Skid Resistance Devices: An Experimental Study (No. PPR980).

Senga, Y., Dony A., Colin J., Hamlat S. y Berthaud Y. (2013). Study of the skid resistance of blends of coarse aggregates with different polish resistances. *Construction and Building Materials* 48 (2013) 901–907. ELSEVIER.

Wambold, J.C., Antle C.E., Henry J.J. y Rado Z. (1995). *PIARC (Permanent International Association of Road Congress) Report*. International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement, C-1 PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, France.

Wilson, D.J. (2013). *The Effect of Rainfall and Contaminants on Road Pavement Skid Resistance*. New Zealand Transport Agency research report 515.

Wu, Z. y Abadie C. (2018). Laboratory and field evaluation of asphalt pavement surface friction resistance. *Front. Struct. Civ. Eng.* 12, 372–381. Estados Unidos.

Wu, Z. y King B. (2012). *Development of surface friction guidelines for Louisiana department of transportation*. Louisiana Transportation Research Center. Louisiana, Estados Unidos.



Wu, Z., King B, Abadie C. y Zhang Z. (2012). Development of Design Procedure to Predict Asphalt Pavement Skid Resistance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2306*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C, Estados Unidos.